

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

Exploration into microscopic nature of
spacetimes by quantum fields and
high-energy particles

量子場及び高エネルギー粒子による
時空微細構造の探求

氏 名	申 請 者	
	宮 本	雲 平
	Umpei	Miyamoto

専攻・研究指導
(課程内のみ)

物理学及応用物理学専攻 宇宙物理学研究

2 0 0 5 年 1 月

著者は修士課程及び博士後期課程の時期において共同研究者と共に次に述べる2つの研究テーマに取り組んできた：(1)一般相対論における『宇宙検閲官仮説』の問題を『曲がった時空での場の量子論』という手法を用いて考察する；(2)時空の量子論的性質を反映していると期待される『非可換幾何学』に内存する物理を抽出し、近年の観測によりその存在が明らかになってきた『超高エネルギー宇宙線』の問題解決等へ応用する。また、我々は上記2つの研究を通して、古典物理学だけでは得難い、時空の「微細構造」についての知見を得ることに取り組んできた。本論文はそれらの研究結果をまとめたものである。以下で、本研究の背景と内容について述べる。

一般相対論は物理法則の座標変換不変性と等価原理をその基礎とする重力理論である。その最も顕著な特徴として、時空を滑らかな4次元多様体とモデル化し、重力は多様体の曲率として定式化されることが挙げられる。しかし、量子論的な観点から言えば、多様体としての時空描像は任意の高エネルギー領域まで成立しているとは考えにくい。一般的には、Planckスケール($\sim 10^{-33}$ cm)付近で時空の量子効果が卓越し、多様体としての描像は破綻すると考えられている。量子物理学の顕著な特徴として、物理量が演算子(一般には非可換)として表されることが、及び物理量が離散値をとることが挙げられるであろう。では、Planckスケールに於ける時空は「非可換な幾何学」によって記述され、その幾何学は時空の「離散構造」を演繹するのであるか？以下に述べるように、現代物理学はこの問いに明確な回答を与えることに成功していない。

平坦な時空での相対論、すなわち『特殊相対論』は『場の量子論』と整合的に融合させてきた。そのことは、重力以外の基本的相互作用、すなわち電磁・弱・強の相互作用が『相対論的場の理論』を用いてゲージ理論として記述されていることから理解できる。しかし、上記3相互作用と同様の手続きによる重力の量子論は繰り込み不可能な発散を含むことが知られ、重力の量子化は非常に困難であると考えられている。そこで、高次元時空や超対称性等の概念を導入することにより、繰り込み不可能性を回避し、さらには全ての相互作用を弦の運動から演繹すると言われる『超弦理論』が「究極の理論」として広く研究されている。また、非摂動的な重力の正準量子化の理論は、近年新しい正準変数を導入することにより急速に発展し、『ループ量子重力』として注目を浴びている。しかし、両理論とも発展途上の段階にあり、ミクロな時空の明確な描像を与えるとは言い難い。

このように、理論的な観点から見れば量子重力理論の構築は現代物理学に残された最大の課題の1つであると言っても過言ではないであろう。では、実際に時空の量子効果が本質的な役割を果たす状況・現象は我々の宇宙に存在するのであるか。更に、存在するとしたらそれらの現象は観測可能なのであろうか。これらの問いに答えることは「量子重力理論」が机上の空論にならない為にも取り組まなくてはならない重要な課題であり、本論文に収められた研究の背後に流れる

一貫したテーマでもある。前者の問いに関しては、一般相対論が膨張宇宙の初期やブラックホール内部に『時空特異点』の存在を予言することを見るだけで十分である。一般相対論に従えば、時空特異点の近傍では時空の曲率半径は任意に小さくなり、一般相対論を含む全ての物理法則が破綻し、必然的に量子重力理論による記述が必要になると考えられるのである。しかし、後者の問い、時空特異点近傍などで起こるとされる「量子重力現象」の観測可能性について答えることは容易ではない。事実、それ自身で一般相対論に於ける一つの分野を築いている。その一つが、本論文に於いて議論される『宇宙検閲官仮説』の問題である。また、平坦な時空に於いても、時空を伝播する粒子のエネルギーが十分大きければ時空の「微細構造」に関する情報が観測・実験により得られる可能性がある。そのような粒子として期待されるのが『超高エネルギー宇宙線』である。以下、本論文に収められた『宇宙検閲官仮説』（研究テーマ（１））及び『超高エネルギー宇宙線』（研究テーマ（２））に関しての我々の取り組みについて順を追って解説する。

（１）進化の最終段階に至った天体は重力崩壊と呼ばれる激しい収縮を起こし、ある臨界質量より重い天体は際限なく収縮し、一般相対論に従えば、その中心付近に時空曲率や物質密度が発散する『時空特異点』が形成する。しかし、既述のように時空特異点の出現は、全ての物理法則の予言能力を消失させる。そこで Penrose は 1969 年、次に述べる『宇宙検閲官仮説』を提唱した：「物理的に尤もらしい重力崩壊によって形成される時空特異点はブラックホールの内部に形成され、遠方の観測者に影響を及ぼすことはない」。しかし、多くの試みにも関わらず、この仮説の証明は成功していない。それどころか、その提唱後、重力場を記述する Einstein 方程式の解としてブラックホールに覆われていない時空特異点、所謂『裸の特異点』を含むものが多数発見されている。従って、それらの解が本当に宇宙検閲官仮説の反例になっているかどうかを様々な観点から検証することは、非常に重要である。Ford & Parker は 1978 年、重力崩壊によるブラックホール形成において、量子論的子生成が起こる (Hawking 輻射) ことに着目し、裸の特異点が形成される際の粒子生成について調べた。それ以後、幾つかの崩壊モデルにおいて同様の研究が行なわれてきた。本論文では、まず第 2 章で重力崩壊による粒子生成の一般論を展開する。その後、第 3 章で『球対称自己相似型重力崩壊』において、裸の特異点が形成される際の粒子生成を崩壊物質の仮定なしに評価する。

『自己相似性』とは重力理論及び系のスケール不変性に起因した対称性の一種であるが、宇宙論や天体物理学に於ける多くの宇宙物理的状況において自己相似解はアトラクターとして振る舞うと期待され（『自己相似仮説』、Carr、1993 年）、特に本解析に含まれる、完全流体を記述する『一般相対論的 Larson-Penston 解』はより一般的な球対称崩壊のアトラクターになっていることが示されている (Harada&Maeda, 2001 年) 点で、現在最も強力な宇宙検閲官仮説の反例と考えられている。結果として、一般 (generic) に粒子生成のエネルギー放射率が特異点出

現までの「残り時間」の逆二乗に比例して増大し、特異点出現の時刻に於いて発散することがわかった。この結果は、量子場から重力場への反作用を考慮したとき、量子場が崩壊を不安定化することを意味し、「半古典的宇宙検閲官」の存在を示唆しているように見える。一方、あるクラスの自己相似崩壊に於いては、裸の特異点が形成されるまで粒子生成が有限に留まることもわかった。このクラスは非常に特殊(non-generic)なものであるが、放射と『特異点の強さ』に密接な関係があることを示唆している。これを受けて、第4章で我々はLemaitre-Tolman-Bondi (LTB) 解と呼ばれる圧力無し完全流体(ダスト)崩壊を用いて、特異点の強さと量子放射の量の相関を調べる。この解を用いると、流体の初期密度プロファイルを調節することにより、形成される裸の特異点の『強さ』を1パラメータで表すことができる。我々は、広いクラスのLTB解に対して、量子放射を解析的に評価することに成功した。その結果、『強い裸の特異点』形成に於いては放射が発散するが、『弱い裸の特異点』形成に於いては、放射が有限に留まることを明らかにした。後者の結果は、「検閲官復活」の為には、粒子生成以外のメカニズムが必要であることを意味しており、一般的に「裸の特異点形成に於ける量子放射は崩壊の詳細によらず発散する」というそれまで信じられてきた常識を覆す意味で非常に興味深い。

(2) 近年、 10^{20} eV程度のエネルギーを持つ『超高エネルギー宇宙線』が観測され、そのエネルギー起源、及び伝播のメカニズムに関して広く議論されている。宇宙線物理学の標準理論によれば、この程度のエネルギーをもつ粒子は宇宙背景放射と衝突することにより急激なエネルギー損失を起こし、宇宙論的な距離から地上に到達するのは不可能と考えられている(GZKカットオフ)。説明には素粒子標準モデルを超えた物理が必要と考える人々も多く、様々な可能性が議論されているが、解決には至っていない。そこで、我々は『非可換幾何学』のモデルである『 κ -Minkowski時空』モデルに注目し、このモデルが超高エネルギー宇宙線の謎を解く可能性について調べた。本論文では、まず、第5章で非可換幾何学の数学的基礎を概観した後、第6章に於いて、 κ -Minkowski時空における波束の群速度について考察する。結果として、光子は理論に現れる分散関係の変更にも関わらず、一定の光速度で伝播することがわかる。この結果は、特殊相対論における因果構造がこの非可換時空でも保たれることを示唆しており、注目に値する。第7章において、GZKカットオフを超える超高エネルギー宇宙線、及び、やはりその到来が謎とされているTeV- γ 線の伝播を議論する。我々は、これらの宇宙線が伝播中に起こすと考えられる素過程において、反応エネルギーの閾値上昇が現れるため、高エネルギーを保ったまま地上に到達することが可能であること示した。

第8章において本論文の総括を行った後、今後の展望を述べる。

研 究 業 績

種 類 別	題 名	発 表 ・ 発 行 掲 載 誌 名	発 表 ・ 発 行 年 月	連 名 者
○論文	Quantum effect and curvature strength of naked singularities	Progress of Theoretical Physics	掲 載 決 定	U. Miyamoto H. Maeda T. Harada
○論文	Semiclassical instability of the Cauchy horizon in self-similar collapse	Physical Review D 69, p. 104005	2004 年 1 月	U. Miyamoto T. Harada
○論文	Particle velocity in noncommutative space-time	Physical Review D 66, p. 105003	2002 年 11 月	T. Tamaki T. Harada U. Miyamoto T. Torii
論文	Have we already detected astrophysical symptoms of space-time noncommutativity?	Physical Review D 65, p. 083003	2002 年 3 月	T. Tamaki T. Harada U. Miyamoto T. Torii
講演 (国際会議)	Semiclassical instability of the Cauchy horizon in dust collapse	The 17th International Conference of General Relativity and Gravitation	2004 年 7 月	U. Miyamoto H. Maeda T. Harada
講演 (国際会議)	Explosive Radiation from Naked Singularity	The 6th RESCEU International Symposium on Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology	2003 年 11 月	U. Miyamoto T. Harada
講演 (国際会議)	Semi-Classical Instability of Cauchy Horizon in Self-Similar Collapse	The 12th International Conference on Gravitation and Astrophysics of Asian-Pacific Countries	2003 年 10 月	U. Miyamoto T. Harada

研 究 業 績

種 類 別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発行年月	連名者
講演 (国際会議)	Particle Creation by Naked Singularity Formed in Self-similar Collapse	The 10th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity	2003 年 8 月	U. Miyamoto T. Harada
講演 (国際会議)	Have we already detected astrophysical symptoms of space-time?	The 21st Texas Symposium on Relativistic Astrophysics	2002 年 12 月	U. Miyamoto T. Tamaki T. Harada T. Torii
講演 (学会)	特異点の強さとコーシー地平線の半古典的不安定性	日本物理学会	2004 年 9 月	宮本雲平 前田秀基 原田知広
講演 (学会)	裸の特異点形成における粒子生成	日本物理学会	2003 年 3 月	宮本雲平 原田知広
講演 (研究会)	Wave Probe of Naked Singularity	第 5 回 特異点研究会	2004 年 1 月	宮本雲平
講演 (研究会)	Can semiclassical effect recover the cosmic censor?	第 13 回 一般相対論と 重力研究会	2003 年 12 月	宮本雲平 原田知広
講演 (研究会)	自己相似重力崩壊における裸の特異点形成からの量子放射	第 4 回 特異点研究会	2003 年 1 月	宮本雲平 原田知広
講演 (研究会)	Particle Velocity in Noncommutative Space-time	第 12 回 一般相対論と 重力研究会	2002 年 11 月	宮本雲平 玉置孝至 原田知広 鳥居隆

研 究 業 績

種 類 別	<div> <div>題名</div> <div> <div>発表・発行掲載誌名</div> <div>発表・発行年月</div> <div>連名者</div> </div> </div>